

Zigbee 物理层学习笔记

zigbee 无线传感网络

Date: 2009/09/02

产品应用笔记

类别	内容
关键词	
摘 要	



修订历史

版本	日期	原因
V1.00	2009/09/02	创建文档

销售与服务网络（一）

广州周立功单片机发展有限公司

地址：广州市天河北路 689 号光大银行大厦 12 楼 F4
邮编：510630
电话：(020)38730916 38730917 38730972 38730976 38730977
传真：(020)38730925
网址：www.zlgmcu.com



广州专卖店

地址：广州市天河区新赛格电子城 203-204 室
电话：(020)87578634 87569917
传真：(020)87578842

南京周立功

地址：南京市珠江路 280 号珠江大厦 2006 室
电话：(025)83613221 83613271 83603500
传真：(025)83613271

北京周立功

地址：北京市海淀区知春路 113 号银网中心 A 座
1207-1208 室（中发电子市场斜对面）
电话：(010)62536178 62536179 82628073
传真：(010)82614433

重庆周立功

地址：重庆市石桥铺科园一路二号大西洋国际大厦
（赛格电子市场）1611 室
电话：(023)68796438 68796439
传真：(023)68796439

杭州周立功

地址：杭州市天目山路 217 号江南电子大厦 502 室
电话：(0571) 28139611 28139612 28139613
28139615 28139616 28139618
传真：(0571) 28139621

成都周立功

地址：成都市一环路南二段 1 号数码同人港 401 室
（磨子桥立交西北角）
电话：(028)85439836 85437446
传真：(028)85437896

深圳周立功

地址：深圳市深南中路 2070 号电子科技大厦 C 座 4
楼 D 室
电话：(0755)83781788（5 线）
传真：(0755)83793285

武汉周立功

地址：武汉市洪山区广埠屯珞瑜路 158 号 12128 室
（华中电脑数码市场）
电话：(027)87168497 87168297 87168397
传真：(027)87163755

上海周立功

地址：上海市北京东路 668 号科技京城东座 7E 室
电话：(021)53083452 53083453 53083496
传真：(021)53083491

西安办事处

地址：西安市长安北路 54 号太平洋大厦 1201 室
电话：(029)87881296 83063000 87881295
传真：(029)87880865

销售与服务网络（二）

广州致远电子有限公司

地址：广州市天河区车陂路黄洲工业区 3 栋 2 楼

邮编：510660

传真：(020)38601859

网址：www.embedtools.com （嵌入式系统事业部）

www.embedcontrol.com （工控网络事业部）

www.ecardsys.com （楼宇自动化事业部）



技术支持：

CAN-bus:

电话：(020)22644381 22644382 22644253

邮箱：can.support@embedcontrol.com

iCAN 及数据采集：

电话：(020)28872344 22644373

邮箱：ican@embedcontrol.com

MiniARM:

电话：(020)28872684 28267813

邮箱：miniarm.support@embedtools.com

以太网：

电话：(020)22644380 22644385

邮箱：ethernet.support@embedcontrol.com

无线通讯：

电话：(020) 22644386

邮箱：wireless@embedcontrol.com

串行通讯：

电话：(020)28267800 22644385

邮箱：serial@embedcontrol.com

编程器：

电话：(020)22644371

邮箱：programmer@embedtools.com

分析仪器：

电话：(020)22644375 28872624 28872345

邮箱：tools@embedtools.com

ARM 嵌入式系统：

电话：(020)28872347 28872377 22644383 22644384

邮箱：arm.support@zlgmcu.com

楼宇自动化：

电话：(020)22644376 22644389 28267806

邮箱：mjs.support@ecardsys.com

mifare.support@zlgmcu.com

销售：

电话：(020)22644249 22644399 22644372 22644261 28872524

28872342 28872349 28872569 28872573 38601786

维修：

电话：(020)22644245

目 录

1. IEEE 802.15.4 标准介绍.....	1
1.1 无线性能参数.....	1
1.1.1 ZigBee 使用的 O-QPSK 是什么调制技术?	1
1.1.2 扩频技术.....	2
1.1.3 主要扩频技术有哪些?	3
1.1.4 接收灵敏度.....	4
1.1.5 发送功率.....	5
1.1.6 链路预算.....	5
1.1.7 EVM.....	5
1.2 天线基础知识.....	6
1.2.1 天线增益.....	6
1.2.2 天线的分类.....	6
2. 结语	8

1. IEEE 802.15.4 标准介绍

1998 年, IEEE 802.15 工作组成立, 专门从事 WPAN 标准化工作。它的任务是开发一套适用于短程无线通信的标准, 分为 4 个工作组:

TG1: 蓝牙工作组: 蓝牙是无线个人局域网最早研究的技术;

TG2: 共存工作组, 解决 802.11 和 802.15 之间共存的问题;

TG3: 高速无线个人区域网络;

TG4: 低速无线个人区域网络;

在此背景介绍下, 我们知道, ZigBee 技术即属于 802.15 工作组 TG4 小组的领域, 因此我们说, ZigBee 是基于 802.15.4 标准的技术。

1.1 无线性能参数

1.1.1 ZigBee 使用的 O-QPSK 是什么调制技术?

首先我们来看看 O-QPSK 中的 PSK 来源于哪里。

数字调制技术有以下四种基本形式: 振幅键控、移频键控、移相键控和差分移相键控。

①振幅键控 (ASK): 用数字调制信号控制载波的通断。如在二进制中, 发 0 时不发送载波, 发 1 时发送载波。有时也把代表多个符号的多电平振幅调制称为振幅键控。振幅键控实现简单, 但抗干扰能力差。

②移频键控(FSK): 用数字调制信号的正负控制载波的频率。当数字信号的振幅为正时载波频率为 f_1 , 当数字信号的振幅为负时载波频率为 f_2 。有时也把代表两个以上符号的多进制频率调制称为移频键控。移频键控能区分通路, 但抗干扰能力不如移相键控和差分移相键控。

③移相键控(PSK): 用数字调制信号的正负控制载波的相位。当数字信号的振幅为正时, 载波起始相位取 0; 当数字信号的振幅为负时, 载波起始相位取 180° 。有时也把代表两个以上符号的多相制相位调制称为移相键控。移相键控抗干扰能力强, 但在解调时需要有一个正确的参考相位, 即需要相干解调。

④差分移相键控(DPSK): 利用调制信号前后码元之间载波相对相位的变化来传递信息。

接着再看 QPSK 的含义。

正交相移键控(QPSK): 一次调制两个比特的相移键控方案, 选择四种载波相移的一种 (0、90、180 或 270 度)。相同带宽条件下, QPSK 可承载传统 PSK 调制两倍的信息量。QPSK 用于传输 MPEG2 视频信号的卫星通信、电缆调制解调、视频会议系统、蜂窝电话和其它数字通信。

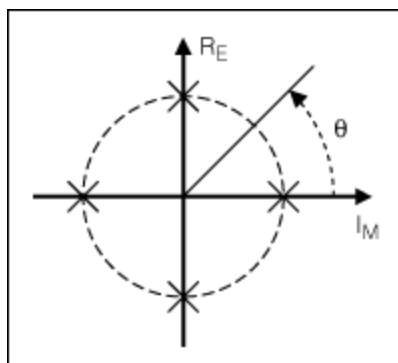


图 1 正交相移键控

ZigBee使用Offset – QuadraturePhase Shift Keying (O-QPSK)调制方式，4个比特表示0~15，4bit替换成一个序列（如下图），扩展频谱。

Table 44: IEEE 802.15.4 symbol-to-chip mapping [1]

Symbol	Chip sequence ($C_0, C_1, C_2, \dots, C_{31}$)
0	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0
6	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

图 2 扩频序列表

ZigBee 底层的 802.15.4 标准适用的是直接序列扩频，但是为什么需要扩频呢？

1.1.2 扩频技术

扩频通信技术是一种信息传输方式，其信号所占有的频带宽度远大于所传信息必需的最小带宽；频带的扩展是通过一个独立的码序列来完成，用编码及调制的方法来实现的，与所传信息数据无关；在接收端则用同样的码进行相关同步接收、解扩及恢复所传信息数据

主要是为了通讯的安全可靠，包括抗干扰性和信息安全两个意义。扩频通信系统由于在发送端扩展了信号频谱，在接收端解扩还原了信息，这样的系统带来的好处是大大提高了抗

干扰容限。理论分析表明，各种扩频系统的抗干扰性能与信息频谱扩展后的扩频信号带宽比例有关。

1. 抗干扰性强，误码率低

扩频通信系统由于在发送端扩展信号频谱，在接收端解扩还原信息，产生了扩频增益，从而大大地提高了抗干扰容限。根据扩频增益不同，甚至在负的信噪比条件下，也可以将信号从噪声的淹没中提取出来，在目前商用的通信系统中，扩频通信是唯一能够工作于负信噪比条件下的通信方式。

由于扩频系统这一优良性能，其误码率很低，正常条件下可达 10^{-10} ，最差条件下也可达 10^{-6} ，远高于普通的微波通信（如通常所说的一点多址）的效果，完全能满足目前国内 SCADA 系统对通信传输质量的要求。应该说，抗干扰性能强是扩频通信的最突出的优点；

2. 易于同频使用，提高了无线频谱利用率

无线频谱十分宝贵，虽然从长波到微波都已得到开发利用，仍然满足不了社会的需求。为此，世界各地都设计了频谱管理机构，用户只能使用申请获得的频率，依靠频道划分来防止信道之间发生干扰。

由于扩频通信采用了相关接收这一技术，信号发送功率极低（ $<1W$ ，一般为 $1\sim 100mW$ ），且可工作在信道噪声和热噪声背景中，易于在同一地区重复使用同一频率，也可以与现今各种窄带通信共享同一频率资源；

3. 抗多径干扰

在无线通信中，抗多径干扰问题一直是难以解决的问题，利用扩频编码之间的相关特性；在接收端可以用相关技术从多径信号中提取分离出最强的有用信号，也可把多个路径来的同一码序列的波形相加使之得到加强，从而达到有效的抗多径干扰。

扩频通信是数字通信，特别适合数字话音和数据同时传输，扩频通信自身具有加密功能，保密性强，便于开展各种通信业务。扩频通信容易采用码分多址、语音压缩等多项新技术，更加适用于计算机网络以及数字化的话音、图像信息传输；

扩频通信绝大部分是数字电路，设备高度集成，安装简便，易于维护，也十分小巧可靠，便于安装，便于扩展，平均无故障率时间也很长；

另外，扩频设备一般采用积木式结构，组网方式灵活，方便统一规划，分期实施，利于扩容，有效地保护前期投资。

1.1.3 主要扩频技术有哪些？

● 直接序列扩频(DS),

直接序列扩频，简称直扩（DS）。所传送的信息符号经伪随机序列（或称伪噪声码）编码后对载波进行调制。伪随机序列的速率远大于要传送信息的速率，因而调制后的信号频谱宽度将远大于所传送信息的频谱宽度。

● 跳频,

载波频率跳变扩频，简称跳频（FH）。载荷信息的载波信号频率受伪随机序列的控制，快速地在给定的频段中跳变，此跳变的频带宽度远大于所传送信息的频谱宽度。

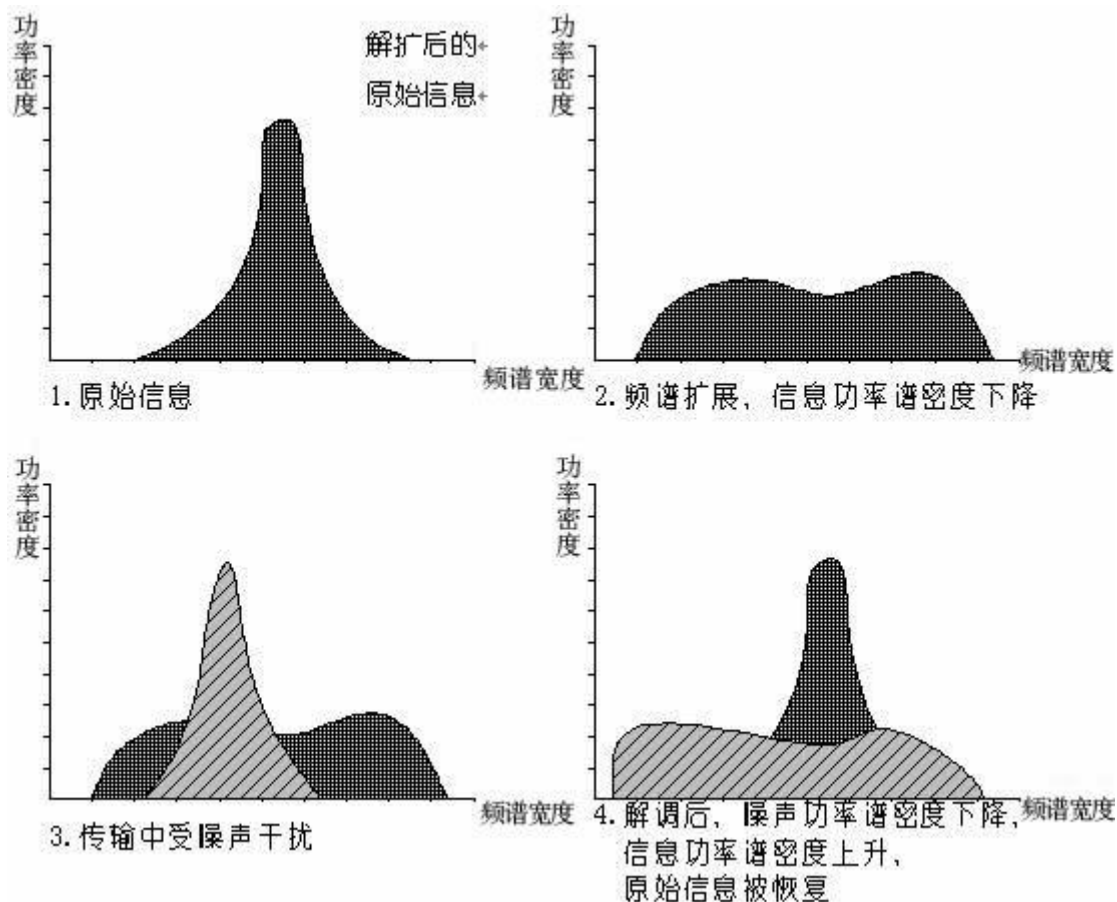


图 3 扩频前后功率谱对照

1.1.4 接收灵敏度

无线传输的接收灵敏度类似于人们沟通交谈时的听力，提高信号的接收灵敏度可使无线产品具有更强地捕获弱信号的能力。这样，随着传输距离的增加，接收信号变弱，高灵敏度的无线产品仍可以接收数据，维持稳定连接，大幅提高传输距离。发送功率。

接收灵敏度按照 dbm 来衡量，因为通常接收的功率门限非常小，因此该数值是负值（ \log_{10} 为底的参数，负值表示小数）。

802.11b/g 要求的接收灵敏度如下：

调制方式	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	CCK	CCK	DQPSK	DBPSK
传输速率	54 Mb/s	48 Mb/s	36 Mb/s	24 Mb/s	11 Mb/s	5.5 Mb/s	2 Mb/s	1 Mb/s
接收灵敏度 d Bm (for BER = 10^{-5})	-68	-69	-75	-79	-83	-87	-91	-94

从表中看出 802.11b/g 对不同的速率要求不同的接收灵敏度，意味着接收端的信号强度越小，速率越低，直至无法接收。

由此看到，在无线网络系统中，提高接收端的接收灵敏度与提高发射端的发射功率同等重要。

802.15.4 标准规定 2.4GHz 射频的最低接收器灵敏度为 -85 dBm ，900 MHz 为 -92 dBm 。802.15.4 的所有供应商都已经超过这个标准，接收器灵敏度在 -90 dBm 至 -100 dBm 之间。尽管 10 dBm 看上去差别并不大，但对作用范围和系统成本影响很大。

如果射频接收器的灵敏度从-94 dBm 提高到-100 dBm，将使射频的作用距离延长一倍。例如，如果接收器灵敏度为-94dBm 的射频作用距离为 100 米，如果将灵敏度提高仅 6 dBm，即-100 dBm，可将范围扩大到 200 米。更重要的是提高灵敏度可避免使用昂贵的高功率功率放大器(PA)，从而降低系统的复杂度、成本和功耗。这样基于这些原因，工程师可选择高灵敏的射频。

接收器灵敏度和发送功率都会影响发送器/接收器的范围。接收器灵敏度越高，发送功率越大，作用距离越远。即使在建筑物中，高发送功率和良好的接收器灵敏度也会提高射频链路的可靠性

1.1.5 发送功率

指的是射频模块发送到天线上的功率，ZigBee 技术使用的功率通常在 0dbm（1mw）到 20dbm（100mw）之间。

射频发射功率越大，所需信号幅度就越大。IEEE 802.15.4 标准所需的最低输出功率为 -3dBm，即 0.5mWatts。目前市场上的射频输出功率在 0 dBm (1 mW)至 3 dBm (2 mW)之间，CEL 模块输出达到了 6dBm（5mW）。收发器芯片输出功率越大，发送性能越好，减少外部功率放大器件（PA）的使用成本，同时外部 PA 也会增加功率，大功率的发送功率也会存在辐射问题，因此，模块本身具备多级的功率控制，才能在传输距离要求和功耗辐射之间达到一个平衡。

中国信息产业部无线电管理委员会规定单个无线接入点设备 RF 发射功率不可超过 100mW，FCC 相关的规定也是 100mw。

1.1.6 链路预算

链路预算为发送功率和接收灵敏度的绝对值之和，它在某种程度上，体现了一个射频芯片的总体收发性能。

例如 ZICM2410 模块，接收灵敏度-97db，发送功率 5mw（6dbm）， $6+|-97|=103$ 。ZICM2410 芯片的链路预算为 $8+|-98|=106$ db，从芯片到模块，损耗了 3db。

1.1.7 EVM

EVM 表征的是调制精度，是衡量现代无线通信系统中数字调制质量的一项关键指标。EVM 是发射信号的理想的测量分量 I（同相位）和 Q（正交相位）（称为基准信号“R”）与实际接收到的测量信号“M”的 I 和 Q 分量幅值之间的矢量差。EVM 适用于每一个发射和接收的符号。

通过 EVM 值可以观察到信号的质量。此值越小说明信号调制质量越高。

下图为 ZICM2410 芯片的 EVM 参数。T1 的芯片 CC2430 的参数值为 11%，相差不是很大。

表 53 电气规范：8MHz 时钟

温度=25℃，VDD=3.0V，内核电压¹=1.5V，MCU 时钟=8MHz²

参数	ZIC2410QN48			ZIC2410FG72			单位
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
误差向量幅度（EVM）		10			9.8		%

图 4 芯片数据手册中的 EVM 参数

1.2 天线基础知识

1.2.1 天线增益

增益是天线的主要指标之一，它是**方向系数与效率**的乘积，是天线辐射或接收电波大小的表现。增益大小的选择取决于系统设计对电波覆盖区域的要求，简单地说，在同等条件下，增益越高，电波传播的距离越远，一般基地台天线采用高增益天线，移动台天线采用低增益天线。

天线的增益通常使用 db 来衡量，例如信号源发送 5mw 的功率出去，在 10 米外检测到信号强度为 10^{-5} mw，如果增加了一个 3db 的天线，那么在该点检测到的信号强度将变为 10-2mw，也就是信号强度增加了 1000 倍。

但是请注意，这不是违背能量守恒定律，天线起到的作用是将球形扩散的无线能量聚集在一起，定向的发送往一个固定的方向（平面）。

也就是说，即使增加了一个 24db 的天线，空间中任何位置的无线能量不会大于信号源的 5mw，除非使用外部能源的信号放大器。

1.2.2 天线的分类

1.全向天线

全向天线，即在水平方向图上表现为 360° 均匀辐射，也就是平常所说的无方向性，在垂直方向图上表现为有一定宽度的波束，一般情况下波瓣宽度越小，增益越大。全向天线在移动通信系统中一般应用与郊区大区制的站型，覆盖范围大。

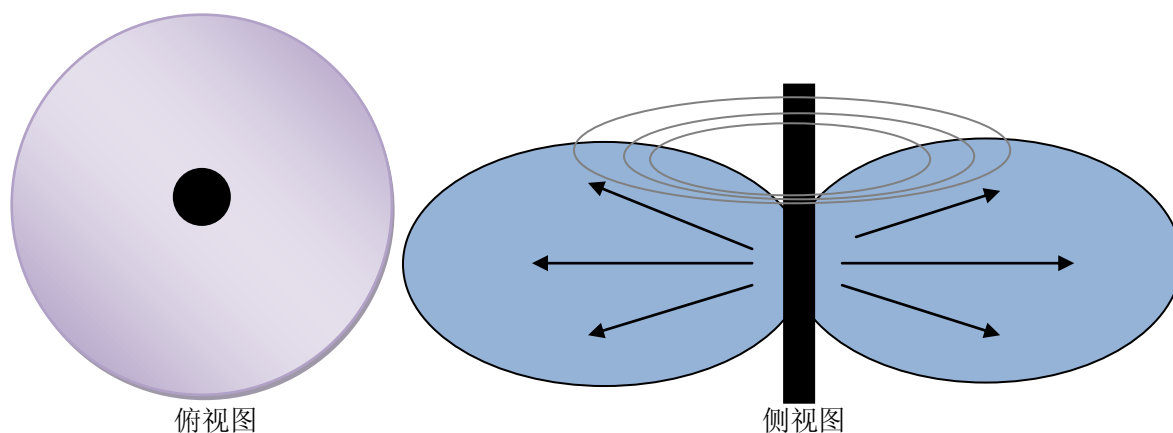


图 5 全向天线能量分布示意图

2.定向天线

定向天线，在水平方向图上表现为一定角度范围辐射，也就是平常所说的有方向性，在垂直方向图上表现为有一定宽度的波束，同全向天线一样，波瓣宽度越小，增益越大。定向天线在移动通信系统中一般应用于城区小区制的站型，覆盖范围小，用户密度大，频率利用率高。

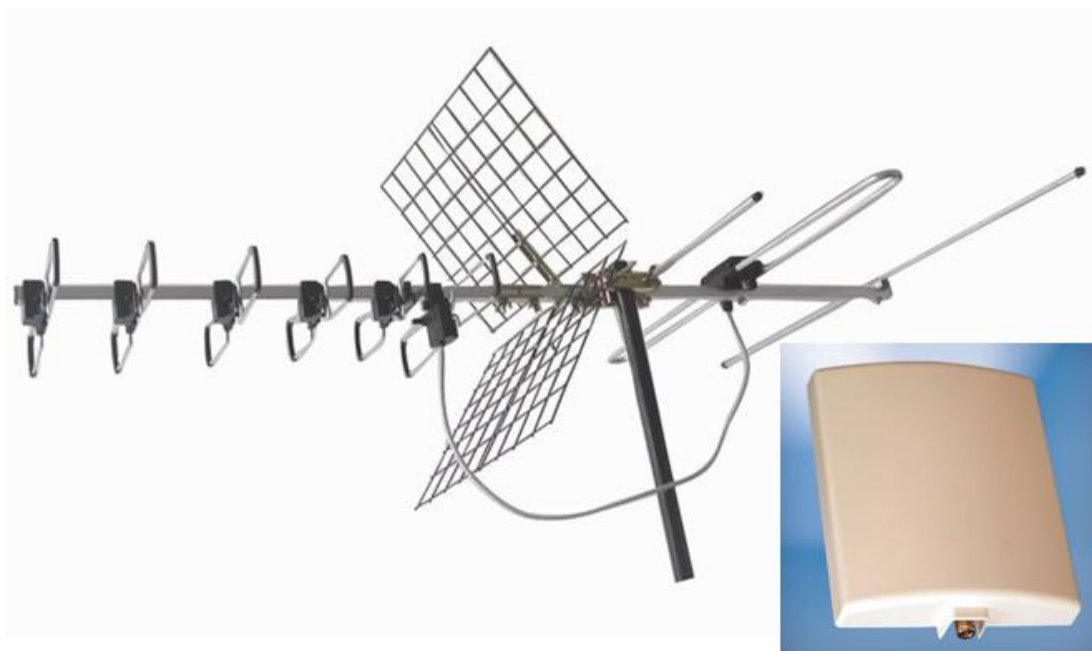


图 6 定向天线（八木天线及板状天线）

根据组网的要求建立不同类型的基站，而不同类型的基站可根据需要选择不同类型的天线。选择的依据就是上述技术参数。比如全向站就是采用了各个水平方向增益基本相同的全向型天线，而定向站就是采用了水平方向增益有明显变化的定向型天线。一般在市区选择水平波束宽度 B 为 65° 的天线，在郊区可选择水平波束宽度 B 为 65° 、 90° 或 120° 的天线（按照站型配置和当地地理环境而定），而在乡村选择能够实现大范围覆盖的全向天线则是最为经济的。

另外，伴随着小型化的发展，内置天线也可以做到较高的增益，例如 ZICM2410 板载天线模块（ZICM2410P0-1）本身提供了 +6dbm 的发送增益，无障碍（line-of-sight）传输距离达到 3000 英尺（900 米），带天线接口模块（ZICM2410P0-1C），则距离可以更远，无障碍传输距离视外置天线增益和传输环境而定。



图 7 板载天线

2. 结语

经过本文，我们对于 2.4G 无线领域的物理层有了一些基础的认识，无线射频技术领域博大精深，每一项技术和产品无不包含着多年的理论探索和应用经验积累，但是国内的研发应用状况却不容乐观，我们只有不断的学习才能走入这个领域，希望广大客户和周立功公司一道，互相学习，伴随着 ZigBee 技术的发展，开拓进取，不仅带来企业效益，更能增强国内的无线技术水平。